新型６自由度柔軟関節肩義手(木下ロボットアームⅡ)の協調動作制御システム

木下　敏治[*]　　竹内　博希[**]　　平田　一真[***]

A Coordinated motion control system for new type flexible Shoulder Disarticulation Prosthesis (SDP) (Kinoshita Robot ArmⅡ) with 6 degrees of freedom.

Toshiharu KINOSHITA , Hiroki TAKEUTI, Kazuma HIRATA

Abstract

In this paper, we propose a practical SDP using very high torque RC servo motor. RCB-4HV is used with control circuit (manufactured by Kondo Kagaku), I can provide a simplified total system of a serial servo control method. The flexible joint SDP have 6 degrees of freedom (θ1: shoulder rotation angle, θ2: shoulder flexion-extension angle, θ3: humeral rotation angle, θ4: elbow flexion-extension angle θ5: wrist rotation angle, θ6: hand prehension angle). Movement of the SDP was measured and potentiometers using the Rcb4CommandGenerator. A practical flexible joint SDP (Flexible joint Robot Arm 1.87Kg) can make by new vibration control theory. A Rise time, A Fall time, Settling time and Steady-state deviation using control engineering is possible to solve it from the fundamental GL900's data. Coordinated motion patterns are made by Heart to Heart 4 (manufactured by Kondo Kagaku). As a result, vibration of prehension part of flexible joint SDP is stopped by principle of conservation of energy.

Keywords: Flexible joint ,Robot Arm, Coordinated motion pattern,SDP

1. まえがき

義手研究の現状については2013年12月29日朝日新聞の1面に詳しく述べられている。動力前腕義手の使用者数がヨーロッパなどと比べると非常に少ないことが書かれている。また、肩義手の実用化されているものについては赤澤先生が参考文献に示している。Google検索で「肩義手ロボット」とキーワードで入力すると現在の研究室レベルの研究現状が詳しくわかる。バイオメカニズム学会誌2014年Vol.38 No.1 P3よりP9に電気通信大学の下条誠先生は「人工の手の研究開発動向」という解説を書いている。アメリカのDARPA's Prototype2 Bionic Handが義手の研究開発の例として詳しく述べられている。解説の「おわりに」の章で「人間のように器用な手」の工学的実現は難しいが、その大いなる有用性から革命的な価値を持つと多くの研究者に励ましの文章を示している。ドイツのオットーボック社では本体重量2.5kgの肩義手の筋電制御システムを2014年の実用化を目標に行っていることがホームページに示されている。キーワードとしては「柔軟アーム」「柔軟関節アーム」「肩義手」などで、この分野の研究の最前線の様子が理解できる。一方、産業用ロボットの開発では1kgの物を15kg～30kgの本体重量のロボットアームで移動させているのが現状である。1975年ごろより宇宙用ロボットの開発で始まった柔軟アーム（釣りざおの様に変形しながら物体を移動させる）の研究では手先の振動を止めることが難しく、各種方式が研究されていることがGoogle検索で理解できる。またロボコンマガジン2014年No.91のP10からP15に2013国際ロボッ

[*]香川高等専門学校詫間キャンパス電子システム工学科
[**]出光興産株式会社
[***]ドコモエンジニアリング四国株式会社

ト展の内容が示されている。P12には安川電機と産総研の共同研究によるバイオ用途の双腕ロボット「MOTOMAN-BMDA3」は、従来機種「SDA10」で220kgあった重量を新構造採用により本体重量を60kgまで軽量化できたと書いてある。どのような新構造なのかは非常に興味深い。本研究は肩義手にも応用でき、産業用ロボットにも使用可能なエネルギー変換効率の良い新型柔軟関節肩義手（ロボットアーム）の開発である。

厚生労働省の調査では、全国18歳以上の身体障害者数（在宅）は、348万3000人（平成18年7月度）と推計されており、その中で肢体不自由者は全体の50.5%を占めている。また前回調査（平成13年6月度）と比較しても、肢体不自由者は0.6%増と年々増加傾向となっている。肢体不自由者のための義手、義足の中で、肩義手は前腕義手などの他の義手、義足に比べて開発が遅れている。その中で電動式前腕義手は、手の開閉の制御に筋電を利用して操作する方式で実用化されている。一方で、電動式肩義手は実用化が遅れている。肩義手は手先まで含めると自由度が非常に多いため制御が複雑になり、駆動させるアクチュエータの数が増え、重量が重くなる。現状、電動式肩義手は制御方式や重量などの問題点が多く、実用に至るには、軽量化等の問題を解決する必要がある。

2. 研究概要

本研究では、前回の6自由度柔軟関節肩義手の問題点を解消し、改良した新型の肩義手を製作した。コントロールボードは通信速度が1.25Mbpsに対応するRCB-4HV(近藤科学製)を用いた。性能評価はRcb4CommandGeneratorで行った。
Rcb4CommandGeneratorによって上腕挙上角(θ2)を0度から120度までステップ応答させ、立上り時間、立下り時間、定常偏差、整定時間(±2%)ステップ応答をポテンショメータとミニロガーGL900で測定した。その後日常的な動作のモーションの作成をHeart To Heart 4にて行った。柔軟関節肩義手(ロボットアーム)は、手先の振動を目標値で静止させることが非常に難しいと立命館大学の有本先生の著書「新版ロボットの力学と制御」で述べられている。得られたデータを以下の各章で示すことにより、今までの肩義手同様、定常偏差などの制御用パラメータの値が実用上問題ない値になっていることが分かった。まず以下の各章においてRCサーボモータ6003HVの基本性能の設定の仕方、RCB-4HVの設定の仕方、Heart To Heart 4でのモーション作成方法などを含む実験方法を示し、得られた結果の波形を示し、それをもとにデータ処理を行った。これまでの研究を円滑に追実験してもらえるように各データの測定方法などをわかりやすくまとめた。

3. 新規に制作した6自由度柔軟関節肩義手

3.1. 肩義手の仕様

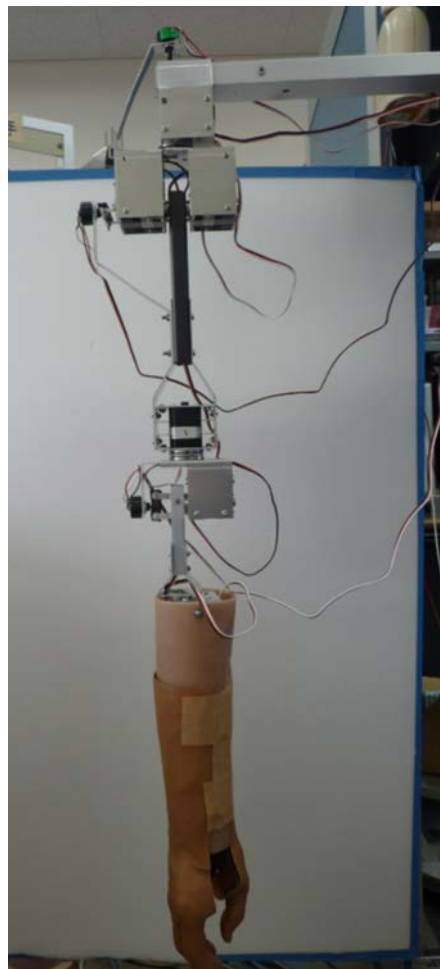



図3.1 新型肩義手全体像

図3.2 義手手先部

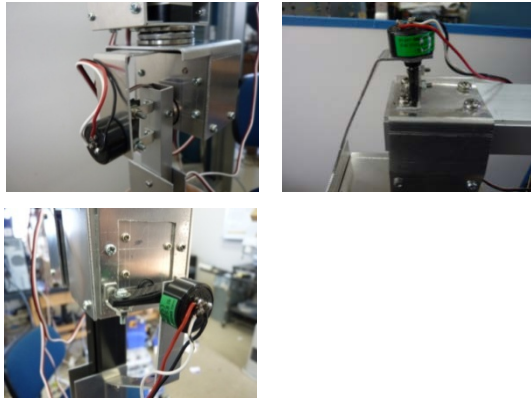



図3.3 各部ポテンショメータ(θ1,θ2,θ4)

図3.1に義手全体像を示す、図3.6のように自由度（θ1 上腕水平回転部，θ2 上腕挙上部，θ3 上腕回旋部，θ4 肘屈曲部，θ5 前腕回旋部，θ6 手の開閉部）のシンプルな構造で義手の材料には1.5mmアルミ板(Mgの含有量2.2～2.8%)とアルミチャンネルを使用した。動力部には大きなトルクが必要なため図3.4に示す近藤科学のKRS-6003HV（最大動作角度270°，トルク67.0kgf･cm，重量100.8g），7個を使用した。上腕挙上部にはモータを2 個使用してトルクの増大をはかった。手先部θ6の力を強め(500gのペットボトルを持つことが目標)患者さんの要求する装飾性を持たせることが本研究の目標である。予算の関係で新しい特注品のグローブを佐藤技研に発注できないため,仕方なく親指部とその他を切り分け使用した。装飾性を持たせるために図3.2のように装飾用グローブの取りつけができる形状に製作した。また、図3.3のように図3.5の回転式ポテンショメータを3個に増設した。その結果、義手の全長は86 [cm]、重量は1.87 [ｋg]となり、前回のものより270[g]重量が増加した。

図3.4　KRS-6003HV

図3.5　回転式ポテンショメー

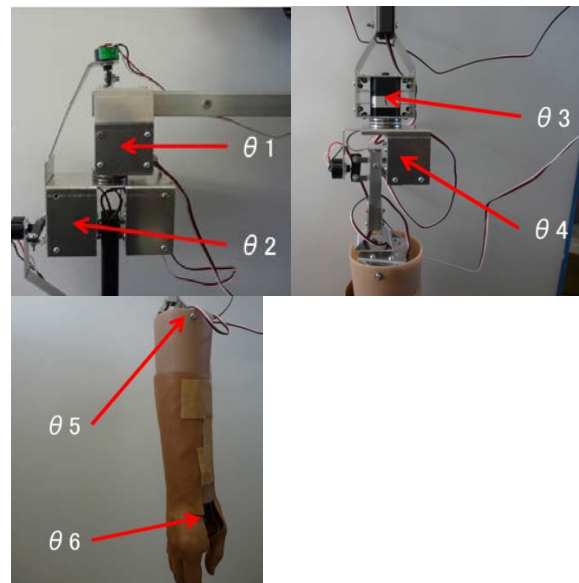



図3.6　θ1，θ2，θ3，θ4，θ5，θ6配置

3.2. モーターのＩＤ設定

以下にモーターIDの設定方法を示す。

図3.7　専用USB

図3.8　パソコンとモーター本体との接続

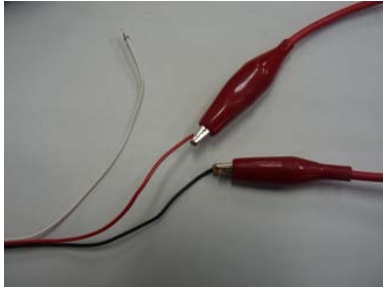



図3.9　専用USBへの10V印加

図3.10　10V電源

モーターのID設定は図3.7の専用のUSB端子とモーターをつなぐことで、パソコン上で行うことができる。図3.8にその外観を示す。この時、図3.9のように専用USBに図3.10の電源で10Vの電圧をかける。これにより書き込みが行えるようになる。次に図3.11のSerial Managerを起動する。図3.12がその操作画面である。

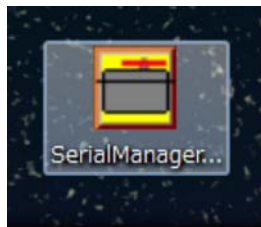



図3.11　Serial Manager

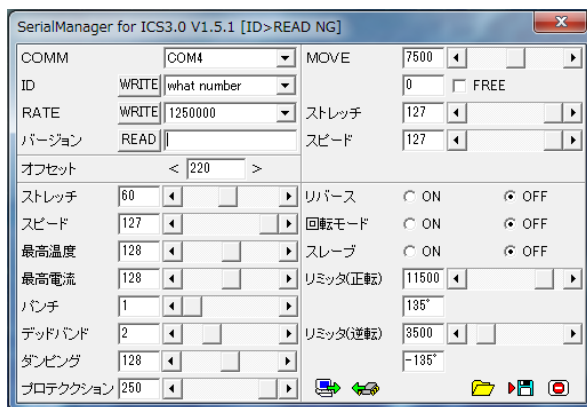



図 3.12　Serial Manager 起動時画面

まず始めに図3.13のようにCOMの選択を行う。この時はCOM9選択する。次にIDの選択を行う。図3.14のようにwhat numberを選択することで接続されているモーターの現在のIDが表示される。任意の数字を選択したのち図3.15のWRITEをクリックし図3.16のようにパソコンのアイコンをクリックすることでデータを書き換えることができる。

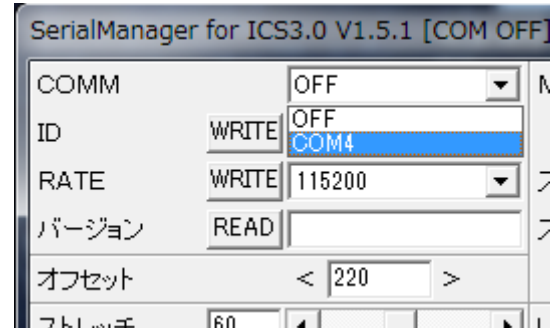



図3.13　COMの選択

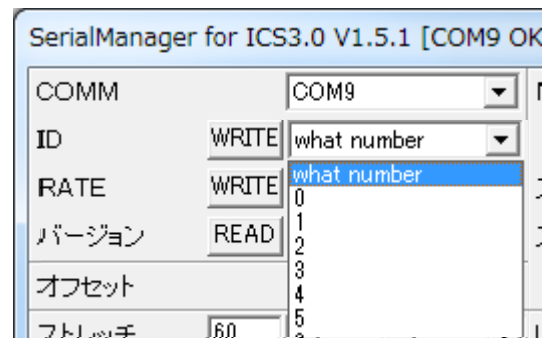



図3.14　IDの選択

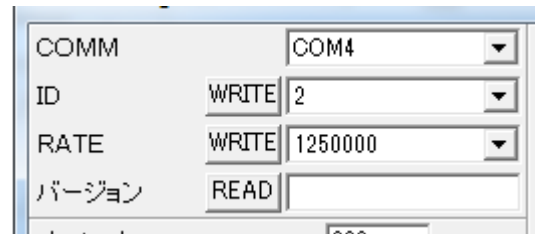



図3.15　書き換えの方法

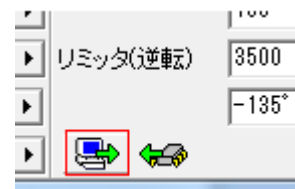



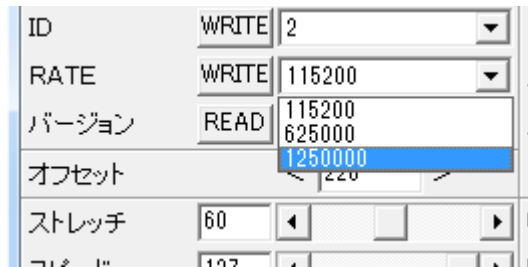
図3.16　モーターへ転送

同様に図3.17のようにRATEも書き換えを行う。今回の研究では1.25 Mbpsを選択する。この時もIDの選択の時と同様、WRITEをクリックし図3.16のようにパソコンのアイコンをクリックすることにより書き換えを行う。今回の肩義手では前回の肩義手との互換性をもた

せるためθ1～θ6までのIDを前回のものと同じにした。

図3.17　 RATEの選択

	ID番号
θ1	1
θ2	2
θ3	4
θ4	6
θ5	7
θ6	8

表3.1　θ1～θ6までのID

θ2では2つのモーターを向き合うように設置しなければならない。そのためθ2の2つ目のモーターは図3.18のようにリバースを選択し、図3.16の転送動作を行う。この時WRITEをクリックする必要はない。書き込みが終了した後、図3.19のMOVEの値を変化させることで実際に動作の確認を行うことができる。この時、MOVEの値が7500になるように設定しておく。これがモーターの初期位置となるためである。初期位置の軸がずれている時は図3.20のオフセットの値を操作することである程度調整することが可能である。動作の確認が完了したらモーターのID設定は完了となる。

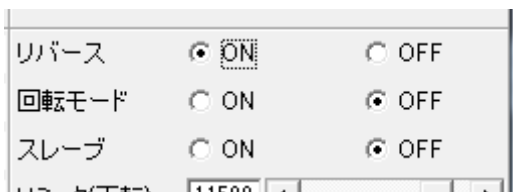



図3.18　リバースの選択)

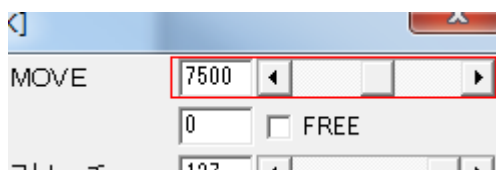



図3.19　動作の確認

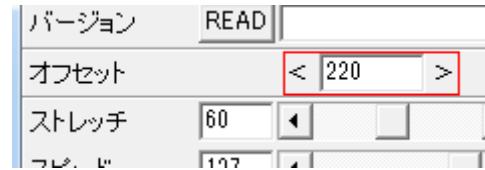



図 3.20　オフセットの調整

3.3. 製作上の注意

各部のパーツ製作が完了し、モーターID設定が完了した後、図3.21のように配線を行いながら組み立てを行うことになる。

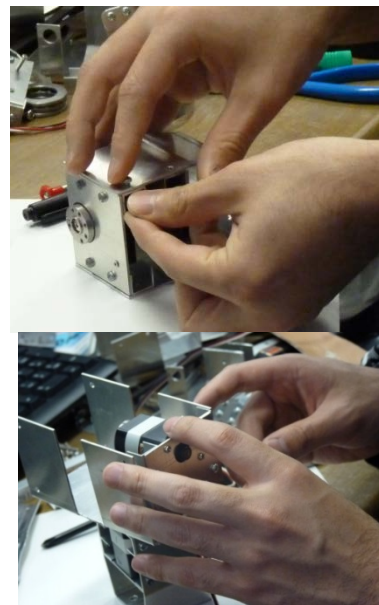
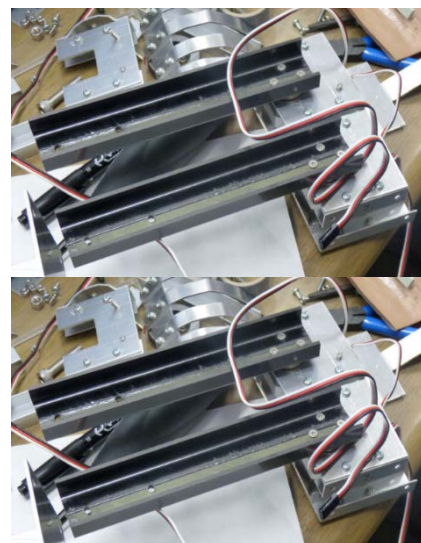



図 3.21　製作過程

この時、モーターに配線を先に行わなければ、図3.22のように配線できない部位がある。

図 3.22　θ2 配線の注意

θ2は完成後、手で配線を行うことが不可能になる。そのため接触不良が無いようにしっかりと配線を完成後モーターとの通信を行うための図3.23のような配線を用意しておかなければならない。そして図3.24のように余分な通信用配線は角材の隙間を利用し収納する。

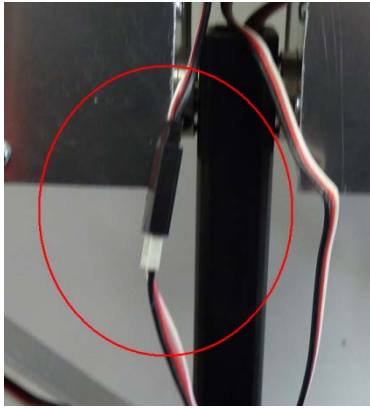



図3.23　パソコンとモーターの通信用配線

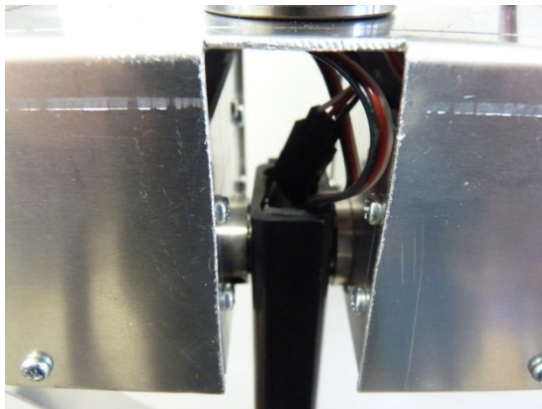



図3.24　余分な配線の収納

3.4. 改良されたθ6の比較

図3.25のようにθ6が大型化し物体を保持しやすくなっていることが分かる。

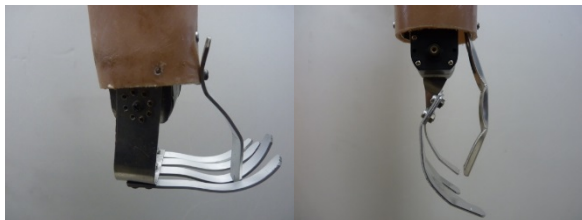



図 3.25　左 前回の義手θ6　右 新型の義手θ6

4. Rcb4CommandGenerator による定常偏差の測定

4.1. 6 自由度柔軟関節肩義手の動作準備

以下に6自由度柔軟関節肩義手の動作を行うための必要事項を示す。

図4.1　専用USB

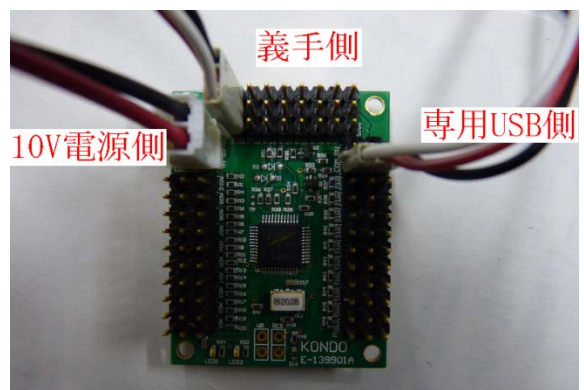



図4.2　RCB-4HVへの結線

義手とパソコンとの接続には図4.1の専用USBと図1のRCB-4HVを使用する。まず、図4.2のようにRCB-4HVへの結線を行う。この時、モーターのID設定に使用した図3.10の10V電源を使用する。専用USBをパソコンへ接続することで義手との接続が完了する。この時、完全に結線が終了するまで10V電源の電源をいれてはならない。線同士の接触によるショートの発生や義手が思わぬ方向に動く可能性があるためである。接続が完了したならば義手の付近に障害となる物体がないことを確認し電源を入れる。この時、各モーターはID設定のときの7500の位置へ回転しようとする。急激に動作する場合があるので安全には十分注意する。

4.2. Rcb4CommandGenerator の起動と設定

図4.3 のRcb4CommandGeneratorを起動すると図4.4の画面が表示される。

図4.3 Rcb4Command Generator

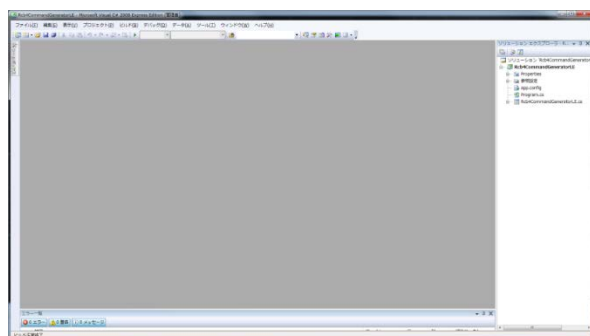



図4.4　Rcb4CommandGenerator起動時画面

画面が表示されたなら図4.5のようにデバックを選択し、デバックなしで開始を選択する。すると図4.6のコントロール画面が表示される。

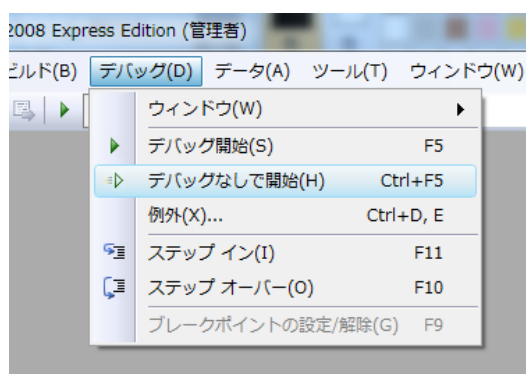



図4.5　デバックなしで開始

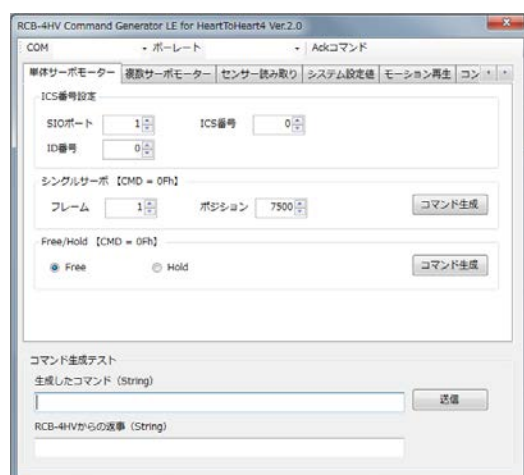



図4.6　コントロール画面

その後図4.7のようにコントロール画面上部のCOMでCOM4を選択する。（COM9は使わない）COMの設定ができたなら、図4.8のようにボーレートをID設定の時と同様に1.25 Mbpsに設定する。面が表示されたなら図4.5のようにデバックを選択し、デバックなしで開始を選択する。すると図4.6のコントロール画面が表示される。

図4.7　COMの選択

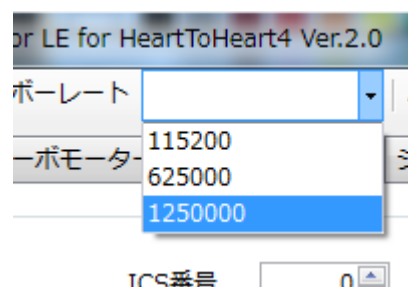



図4.8　ボーレートの選択

4.3. Rcb4CommandGenerator の操作

設定が完了した場合、実際に操作が可能になる。表3.1を参考にしながら図4.9のように操作したいθのID番号を選択する。この時他のパラメータを変更する必要はない。ID番号を選択したら図4.10のように表4.1を参考にしながらポジションの値を入力する。

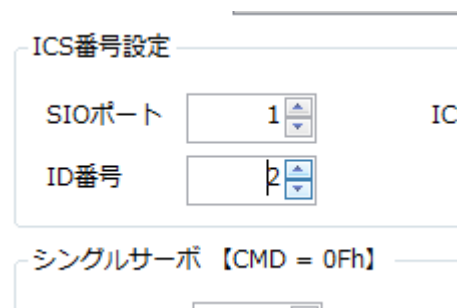



図4.9　IDの選択

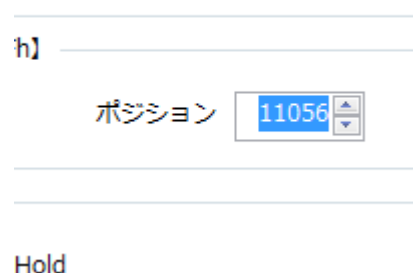



図4.10　ポジションの選択

	ポジションの値
120°	11056
90°	10167
60°	9278
30°	8389
標準	7500
─90°	4833

表4.1　ポジションの値による角度

ポジションの値の入力が完了したなら図4.11のようにポジション横のコマンド生成ボタンを選択する。すると図4.12のようにコマンド生成テストに生成したコマンドが表示される。図4.13のように送信ボタンを選択することで義手が実際に動作する。

図4.11　コマンド生成

図4.12　生成したコマンド

図 4.13　コマンドの送信

4.4. GL900 の測定準備

以下にGL900の測定準備方法を示す。

図4.14　GL900本体

図4.15　5V電源

図4.16　GL900とポテンショメータの結線

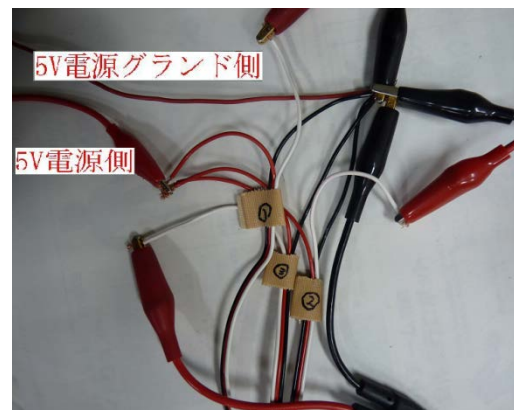



図4.17　ポテンショメータ3つの結線

図4.14のGL900に装着したケーブルと図4.15のポテンショメータ用5V電源、図3.5の回転式ポテンショメータを図4.16のように結線をする。3つのポテンショメータを取り付ける際には、3つのグランドと3つの電源の結線はそれぞれ共通にする。GL900+電極はポテンショメータ3つそれぞれ分けて結線する。実際に結線を行ったものが図4.17となる。

4.5. Rcb4CommandGenerator を用いた GL900 による測定

上記の結線においてショートがないことを確認し図4.14のGL900本体と図4.15の5V電源の電源をオンにする。図4.18のGL900APSを選択しその指示に従うと図4.19 のようなGL900の操作画面が表示される。

図4.18　GL900APS

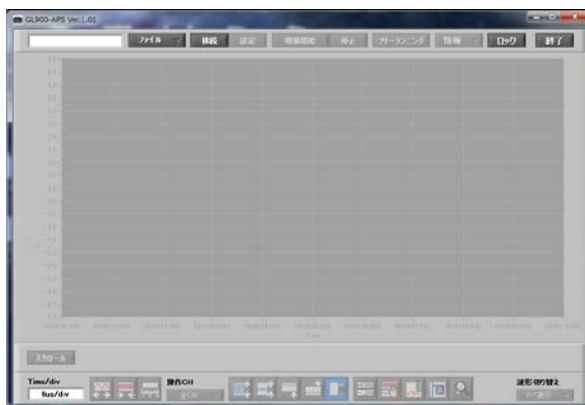



図4.19　 GL900操作画面

図4.20　本体との接続

次に図4.20のように接続を選択する。すると図4.21の接続画面が表示される。接続画面下部の接続ボタンを選択する。図4.22の画面が表示されたら接続完了であるため閉じるボタンを選択する。接続画面を閉じると図4.23､図4.24で示すフリーランニング画面に切り替わる。

図4.21　接続画面

図4.22　接続完了画面

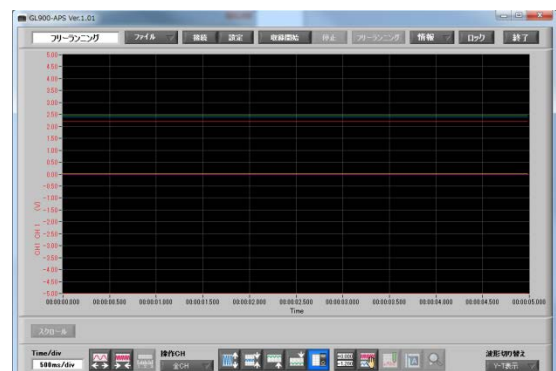



図4.23フリーランニング画面

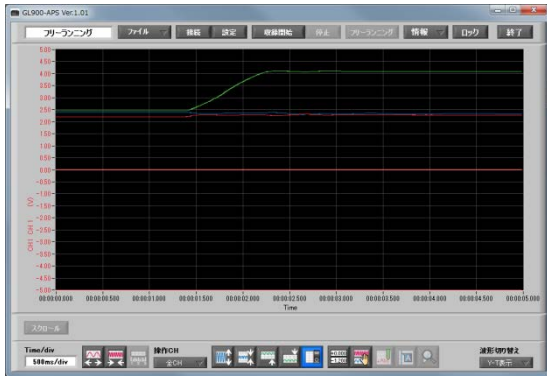



図4.24　θ2を動かした時の画面

図4.25　収録開始

図4.26　収録中

図4.27　収録停止

図4.28　再生

図4.25のGL900操作画面上部の収録開始を選択すると図4.26のようにデータの収録が開始される。収録を停止したい時は図4.27の停止を選択することでデータの収録が停止し、そのデータが保存される。フリーランニングを再開したい場合図4.28の再生を選択する。保存したデータのチェックをしたい場合、図4.29のようにファイルから開くを選択すると図4.30が表示され、一覧でデータを選択すると図4.31のデータファイル一覧が表示される。

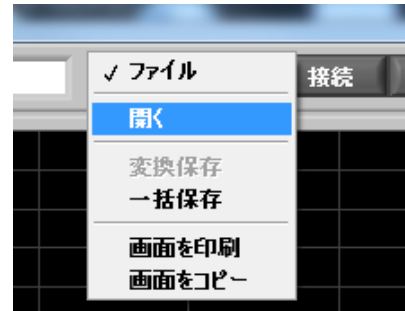



図4.29　ファイルを開く

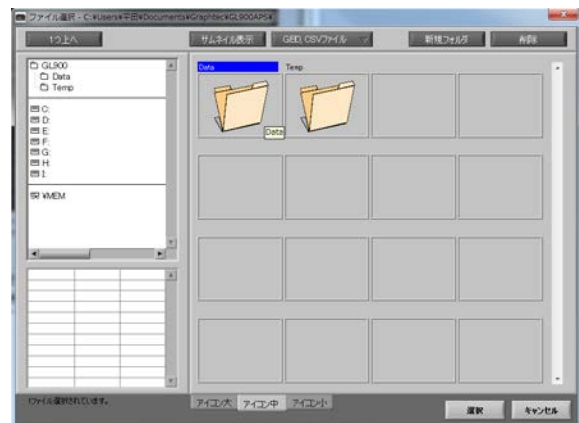



図4.30　データファイル

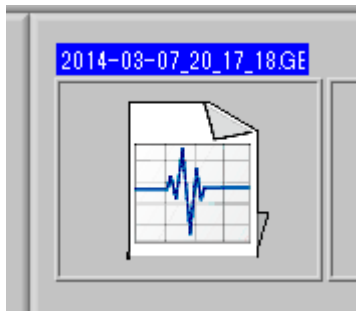



図4.31　データファイルの一覧

図4.32　収録したデータ

図4.31のデータファイルの一覧から収録した日にちのファイルを選択することで図4.32に示すように収録したデータを確認できる。

4.6. GL900 の測定結果のデータ解析

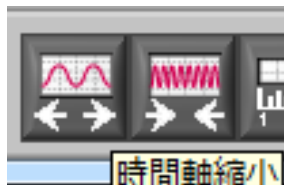



図4.33　横軸の拡大縮小

図4.34　縦軸の拡大縮小

図4.35　データ全体の上下

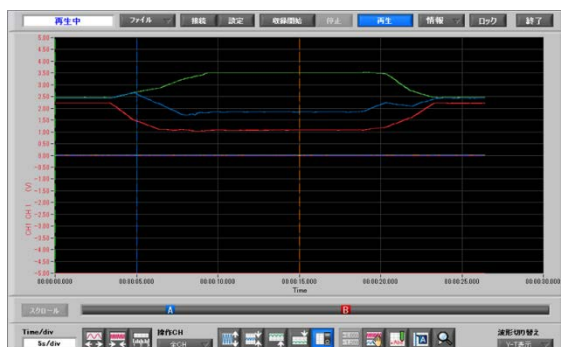



図 4.36　変換前

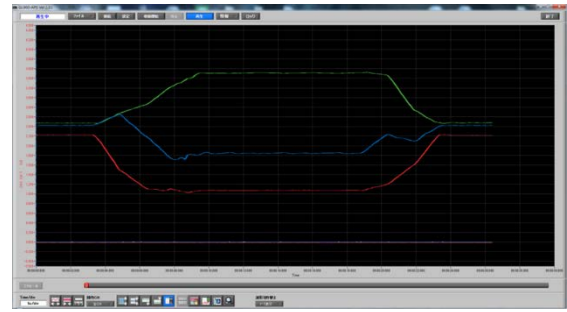



図 4.37　変換後

図4.33，図4.34，図4.35のそれぞれの機能を使用し図4.36のようなデータを図4.37のように見やすく変換する。データの変換後下記のようにデータを測定する。

図4.38　データの一例

図4.39　カーソル情

カーソル情報

カーソルAへ移動　カーソルAを表示　ABカーソル同期
カーソルBへ移動　カーソルBを表示　カーソル固定

CH	アノテーション	カーソルA	カーソルB	A-B	単位
CH1	CH 1	+2.206	+2.295	-0.089	V
CH2	CH 2	+2.400	+2.331	+0.069	V
CH3	CH 3	+2.449	+4.101	-1.652	V
CH4	CH 4	-0.005	-0.007	+0.002	V
CH5	CH 5	-0.007	-0.005	-0.002	V
CH6	CH 6	-0.002	-0.003	+0.001	V
CH7	CH 7	+0.001	+0.002	-0.001	V
CH8	CH 8	-0.005	-0.005	+0.000	V
Pulse1		+0	+0	+0	RPM
Pulse2		+0	+0	+0	RPM
Pulse3		+0	+0	+0	RPM

カーソル	日付 時間	相対時間
A	2014/03/07 20:28:32	00:00:01.229336
B	2014/03/07 20:28:38	00:00:07.068685
A-B	2014/03/07 20:28:25	-00:00:05.839349

詳細表示

図4.40　カーソル情報データ画面

CH	アノテーション	カーソルA	カーソルB	A-B	単位
CH1	CH 1	+2.206	+2.295	-0.089	V
CH2	CH 2	+2.400	+2.331	+0.069	V
CH3	CH 3	+2.449	+4.101	-1.652	V
CH4	CH 4	-0.005	-0.007	+0.002	V
CH5	CH 5	-0.007	-0.005	-0.002	V
CH6	CH 6	-0.002	-0.003	+0.001	V
CH7	CH 7	+0.001	+0.002	-0.001	V
CH8	CH 8	-0.005	-0.005	+0.000	V
Pulse1		+0	+0	+0	RPM
Pulse2		+0	+0	+0	RPM
Pulse3		+0	+0	+0	RPM

カーソル	日付 時間	相対時間
A	2014/03/07 20:28:32	00:00:01.229336
B	2014/03/07 20:28:38	00:00:07.068685
A-B	2014/03/07 20:28:25	-00:00:05.839349

詳細表示

図 4.41　必要なデータの選択

	基準電圧	0.02	ぷらす2%	まいなす2%
上	4.101	0.08202	4.18302	4.01898
下	2.449	0.04898	2.49798	2.40002
電圧差	1.652			
実際に動いた角度	112.336			
電圧差の10%	0.1652			

表 4.2　上記データの処理

図4.41のようにA－Bにおける振動が発生していない部分の各値をデータとして記録する。表4.2に示すようにデータを処理し、プラスマイナス2%の範囲に収まる値の最大点同士にカーソルを合わせることで立上り整定時間と立下り整定時間を測定することができる。

4.7. 実際に得られたデータ

	電圧差[V]	定常偏差[°]	立ち上り時間
新型	1.9	2.81	0.633[s]
前回	1.71	3.54	0.579[s]
	立ち下り時間	立ち上り整定時間	立ち下り整定時間
新型	0.366[s]	1.063[s]	2.407[s]
前回	0.376[s]	0.982[s]	2.176[s]

表 4.3　新型 1.87kg と前回 1.6 kgの θ2 目標値 120°に対する制御パラメータ

表4.3は図4.42から得られたデータと前回の肩義手とのデータをまとめたものである。計算式は　角度X°：出力V＝340°：　5.26V　で行っている。図4.43, 図4.44は電圧を5.00Vで測定した結果である。

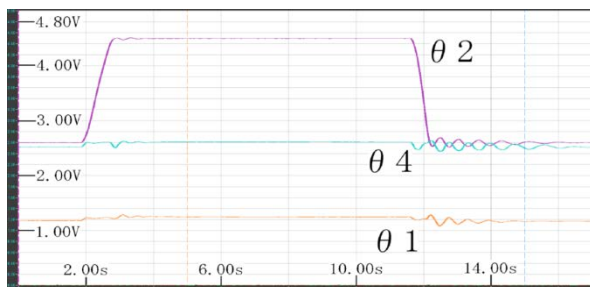



図 4.42　負荷なし θ 2=120°　定常偏差

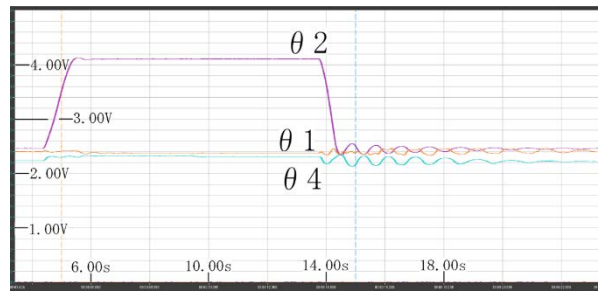



図4.43　負荷200ｇ θ2＝120°　定常偏差

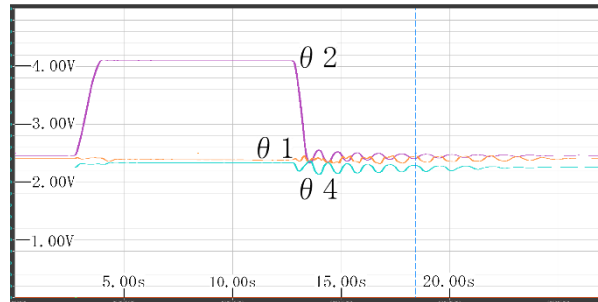



図4.44　負荷300ｇ θ2＝120°　定常偏差

これらのデータより全体の重量の増加の影響により立上り時間が増加し、立下り時間の減少、各整定時間の増加がみられた。

上腕挙上角 θ2の目標角度を120°　と90°　に設定してステップ応答波形をGL900で測定し、データ波形を解析した。負荷を0g、200g、300gと変化させると θ2の定常偏差は少しずつ前回のデータに近づいた。また500gでは θ4に振動が発生した。 θ4を60°　に設定すると軽減された。

5. Heart To Heart4 による協調動作パターンの作成

5.1. Heart To Heart4 の起動

測定器等の電源を入れ、図5.1のHeart To Heart4を起動すると図5.2の起動時画面が表示される。Heart To Heart4では教示機能により様々なデータを再現することができる。以下にその方法を示す。

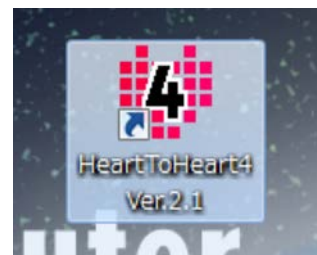



図5.1　Heart To Heart4

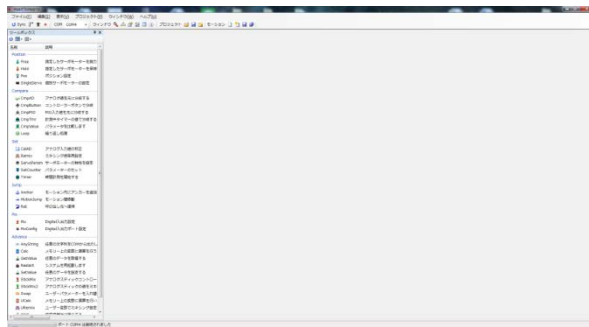



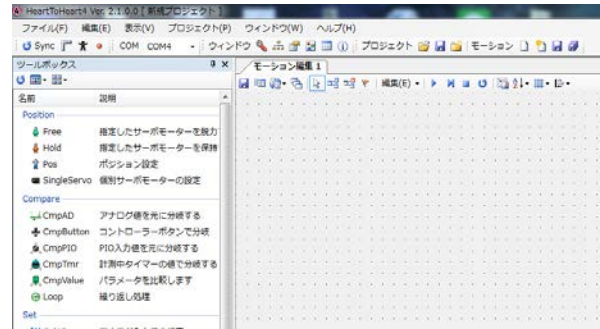
図5.2　Heart To Heart4起動時画面

5.2. Heart To Heart4 の使用方法

図5.3　新規プロジェクトを開く手順

図5.3の手順で初めにプロジェクトを開く。次に図5.4の手順でモーション製作画面に移ることができる。

図5.4　モーションの新規作成

図5.5　モーション編集画面

図5.5のモーション製作画面では図5.6のポジション設定と図5.7の指定時間の停止を主に使用する。そして図5.8のようにPosをドラッグしモーション編集画面まで持っていくことでポジションの配置ができる。これはWaitでも同様である。この様にして図5.9のようにポジションの複数配置を行う。

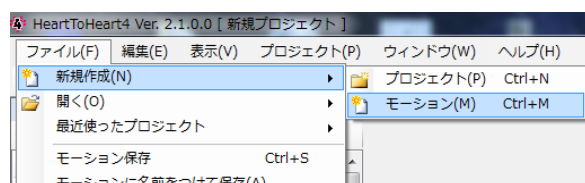



図5.6　ポジション設定

図5.7　指定時間の停止

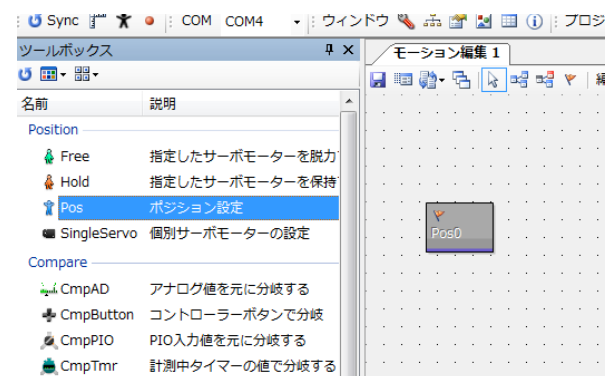



図5.8　ポジションの配置

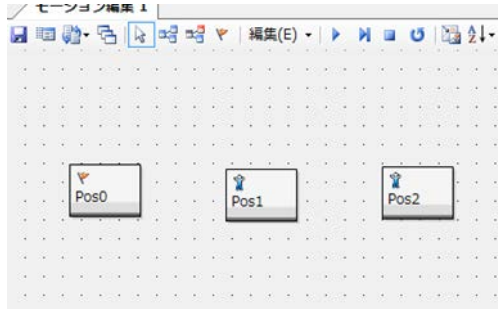



図5.9　ポジションの複数配置

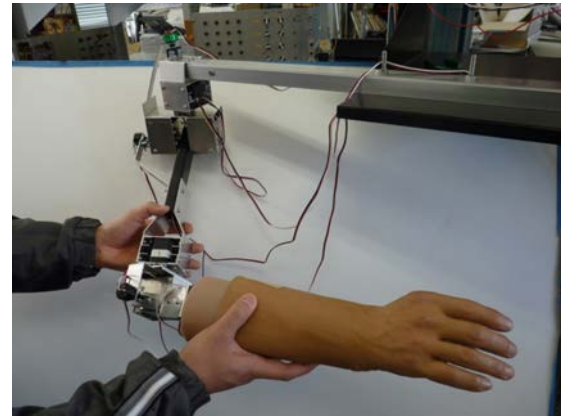
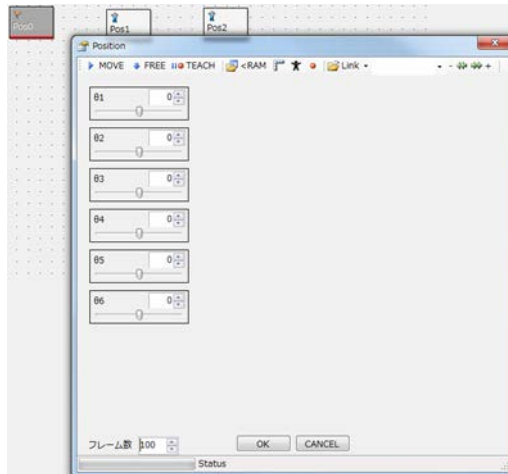



図5.10　ポジションの設定

図5.10のようにポジションを選択することで設定を行うことができる。その際設定には教示機能を使用する。図5.11のように設定する θ を選択し教示ボタンを押すことで選択した θ のみ図5.12のように変化させることができる。そして目標の位置で保持しながらもう一度教示ボタンを押すことでそのポジションを記憶することができる。

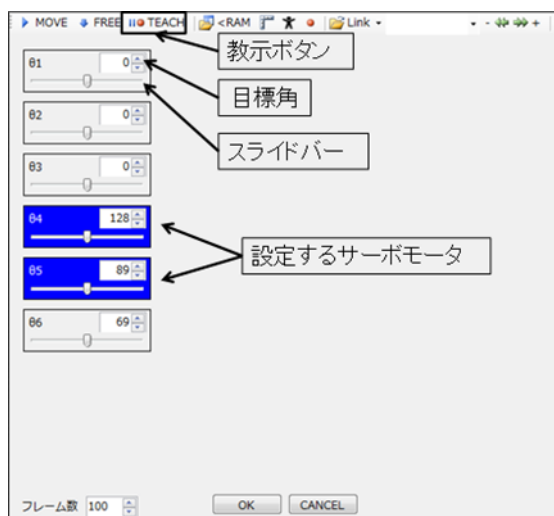



図5.11　教示機能によるポジション設定

図5.12　教示の様子

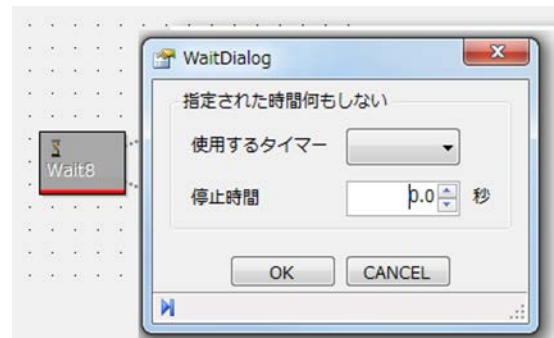
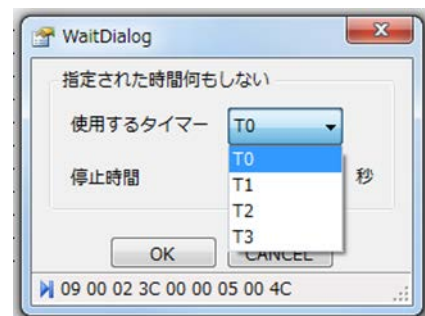



図5.13　Waitの設定

図5.14　タイマーの設定

Waitの設定方法は図5.13の停止時間を任意の秒数に指定し、図5.14のように使用するタイマーにT0を選ぶとよい。

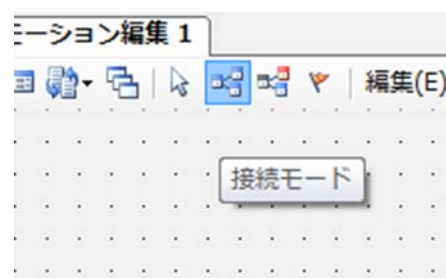



図5.15　接続モード

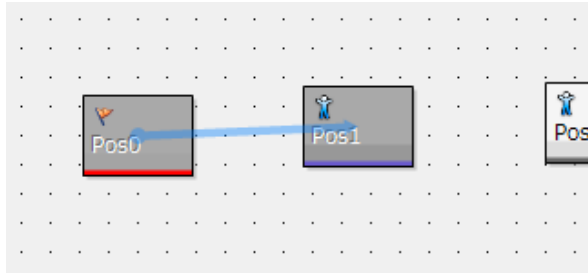



図5.16　ポジション同士の接続

ポジションの配置が完了したら図5.15の接続モードを使用して図5.16のようにポジション同士の接続を行う。接続モードではポジション等の設定できないため切り替えを忘れないようにする。ポジションの設定と接続が完了したら図5.17のモーションの再生を選択することで実際にモーションの再生ができる。

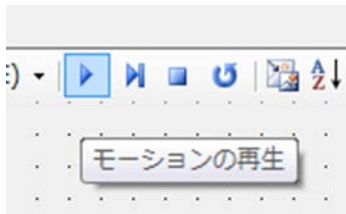



図5.17　モーションの再生

5.3. Heart To Heart4 による教示機能を用いた測定結果

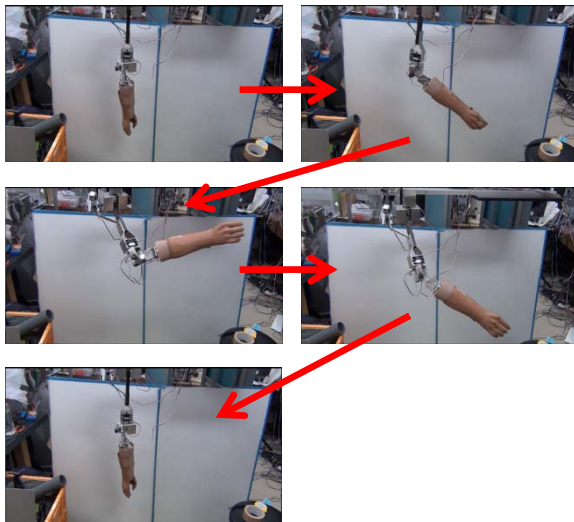



図5.18　コップで水を飲む協調動作

図5.18、および図5.19の矢印は時間の流れを示している。ソニーのビデオカメラにフルハイビジョンで録画したデータから各時間の写真データを切り取り使用したデータである。

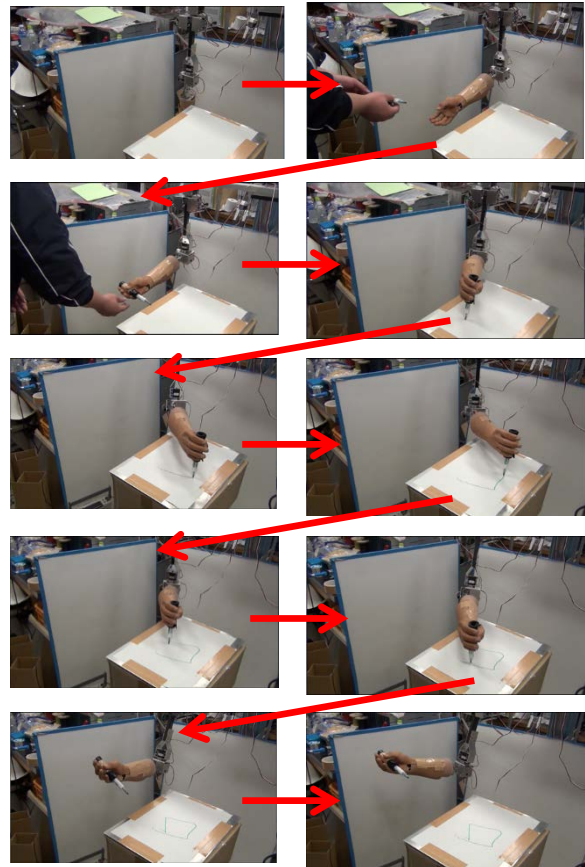



図5.19ペンを受け取り四角い線を描く動作

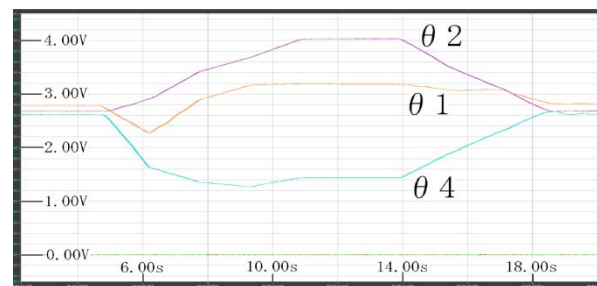



図5.20　コップで水を飲む協調動作

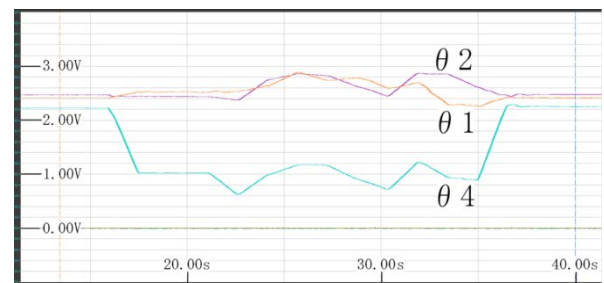



図5.21　ペンを受け取り四角い線を描く動作

ペットボトルの水を飲む動作パターン,体の正面を水平方向にペットボトルを持った状態で移動させる動作パターンでも同様のデータが得られ、振動していないことが確認された。

6. まとめ

図5.20,図5.21に示すように,実際の協調動作ではいずれの動作も大きな振動が発生しておらず,装飾用グローブを装着しながらも、実用的な動作が可能な肩義手を完成した。Heart To Heart4のVer2.01には各自由度のサンプリングポイント間の時間軸を変数とした3次,4次,5次関数で補間(複数の分割方法を選択できる)し、滑らかな動作を実現可能としている。この様な協調動作パターンをRCB-4HVは重量12gの軽量なコントロールボードで120個のモーションを保存できる能力がある。日常生活動作で必要と思われる各種動作パターンを作成し、それらの動作パターンをどのように選択するかが今後の課題である。具体的には両肩の動きや頭の方位角などを組み合わせることで実現可能だと予想される。2014年7月に発売予定のKRS-6003RHVを用いれば寸法は同じでより安定な動作が実現可能と予想される。

7. 謝辞

佐藤技研、近藤科学の各株式会社には研究に協力していただき深く感謝しています。研究に協力してくれた木下研究室の林直人君、前田悠哉君に感謝します。

参考文献

1) 木下敏治，川井由宇，山口彰大，香川悠，久本将貴：“肩の 2 自由度に柔軟関節を用いた 6 自由度柔軟関節肩義手のモーションプロセッサ 2HV を使用した顔面方位制御システムの開発”, 香川高等専門学校研究紀要第 1 号, p.113-130（2010）
2) 木下敏治, 山口彰大：“高トルクなシリアル RC サーボモータを用いた 6 自由度柔軟関節肩義手の協調動作制御システム”，香川高等専門学校研究紀要第 1 号, p.131-138（2010）
3) 近藤科学株式会社, MP2Editor+MotionGenerator 取扱説明書（2009）
4) 舟久保熙康：“医用精密工学 - 生体への工学的アプローチ - ”， 丸善株式会社（1983）
5) 赤澤堅造 他，動力義手・装具の研究開発の現状と将来, BME（医用電子と生体工学）, Vol.13, No.2，p.34-41 (1999)
6) Inoue Takahiro, Mechanics and control of soft-fingered manipulation, Springer(2008)
7) Birglen Lionel, Under actuated robotic hands,Springer(2008)
8) 有本卓，Control theory of multi-fingered hands: a modeling, Springer(2007)
9) 加藤 他,筋電義手使用による運動機能再建の評価,日本ロボット学会誌 October 2009，Vol.27No.8, p.102-108(2009)
10) 木下 他：“クランク拮抗方式による形状記憶合金ロボットシステムの研究”，詫間電波工業高等専門学校研究紀要,第 34 号，p.47-56(2006)
11) 木下 他：“RC サーボモータを用いた 6 自由度肩義手の協調動作制御システムの開発”，詫間電波工業高等専門学校研究紀要,第 35 号, p.33-44(2007)
12) 木下 他：“高トルク・軽量な RC サーボモータを用いた 6 自由度肩義手の開発”， 詫間電波工業高等専門学校研究紀要,第 35 号, p.45-52 (2007)
13) 木下 他：“ロボットコントロールボード RCB-1 を用いた 6 自由度肩義手の協調動作制御システムの開発”，詫間電波工業高等専門学校研究紀要,第 36 号, p.37-46(2008)
14) 木下 他：“RC サーボコントローラ AGB65-RSC を用いた 6 自由度肩義手の協調動作制御システムの開発”，詫間電波工業高等専門学校研究紀要,第 36 号, p.47-56(2008)
15) 木下 他：“肩義手のための RC サーボコントローラ AGB65-RSC を用いた感圧センサーの開発”， 詫間電波工業高等専門学校研究紀要, 第 37 号,p.55-67(2009)
16) 木下 他：“6 自由度肩義手協調動作制御システム用モーション作成の研究”，詫間電波工業高等専門学校研究紀要，第 37 号，p.69-85(2009)
17) 有本 卓,柔軟関節ロボットの制御,新版ロボットの力学と制御,朝倉書店, p.96-99(2002)
18) 有本卓，Control theory of non-linear mechanical systems：a passivity-based and circuit-theoreic approach, Clarendon Press (1996)
19) B&W (Bowers & Wilkins)800 Series カタログ(2009)
20) フィクスト・サスペンション・トランスデューサー（略称 FST), B&W (Bowers & Wilkins)683/684 Series カタログ(2009)
21) 日本塑性加工学会，非線形有限要素法，コロナ社(1994)
22) 舟久保熙康,医用精密工学-生体への工学的アプローチ,丸善株式会社(1983)

23)顧 蘭明,肩義手の顔面方位制御アルゴリズムの改良，詫間電波工業高等専門学校昭和 62 年度卒業論文(1987)
24)久本 将貴，6 自由度肩義手の顔面方位制御システムの開発，香川高等専門学校詫間キャンパス電子通信システム工学専攻科平成 20 年度専攻科特別研究論文集(2009)
25)木下 他：“6 自由度肩義手協調動作制御システム用モーション作成の研究,詫間電波工業高等専門学校研究紀要”, 第 37 号, p.69-85(2009)
26)近藤科学株式会社，シリアルマネージャー for ICS3.0 V1.5 ソフトウェアマニュアル（2009）
27)近藤科学株式会社，Heart To Heart4 Ver2.1 ソフトウェアマニュアル(2013)
28)木下敏治，平田一真，坂井剛士，篠原稜：“高トルクな６自由度柔軟関節肩義手(ロボットアーム)の改良”，香川高等専門学校研究紀要第４号 p.109-120(2013)
29)木下敏治，平田一真，篠原稜，坂井剛士：“RCB-4HV による新しい６自由度柔軟関節肩義手(ロボットアーム 1.6kg)の開発”，香川高等専門学校研究紀要第 4 号 p.121-134(2013)
30)高野正晴：詳説 ロボットの運動学，オーム社，(2004)
31)ロボコンマガジン No.94，オーム社(2014)